

Optimale toewysing en skedulering van werkers en take op 'n monterbaan

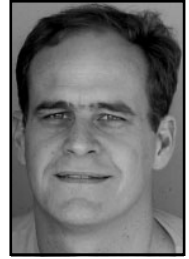
Optimal assignment and scheduling of workers and tasks on an assembly line

L VENTER EN SE VISAGIE

Departement Logistiek, Universiteit van Stellenbosch,
Privaat Sak X1, Matieland, 7602, Suid-Afrika,
e-pos adresse: lieschenventer@gmail.com en
svisagie@sun.ac.za



Lieschen Venter



Stephan Visagie

<p>LIESCHEN VENTER is tans 'n nagraadse student in die Departement Logistiek aan die Universiteit Stellenbosch. Sy het die grade BSc (Wiskundige Wetenskappe) en Honneurs BComm (Operasionele Navorsing) aan die Universiteit Stellenbosch behaal. Sy is tans besig met 'n MComm (Operasionele Navorsing) en haar tesis handel oor metaheuristieke vir mengprobleme in die petrochemiese industrie.</p>	<p>At present LIESCHEN VENTER is a postgraduate student in the Department of Logistics at the University of Stellenbosch. She obtained the degrees BSc (Mathematical Sciences) and BComm Honours (Operations Research) from the University of Stellenbosch. She is currently busy with her MComm (Operations Research) and her thesis is on metaheuristics for blending problems in the petrochemical industry.</p>
<p>STEPHAN VISAGIE het die grade BSc (Fisika), MSc (Toegepaste Wiskunde), MPhil (Vervoer en Logistiek) en 'n PhD (Operasionele Navorsing) aan die Universiteit van Stellenbosch behaal. Hy het in 1998 by die Departement Logistiek aan die Universiteit van Stellenbosch aangesluit en is tans medeprofessor in Operasionele Navorsing by hierdie departement. Sy navorsingsbelangstelling sluit in nielineêre knapsakprobleme en die toepassing van optimeringstegnieke in diverse velde soos landbou, produksie, skedulering en steme-teorie.</p>	<p>STEPHAN VISAGIE obtained the degrees BSc (Physics), MSc (Applied Mathematics), MPhil (Transport and Logistics) and a PhD (Operations Research) at the University of Stellenbosch. He joined the Department of Logistics at the University of Stellenbosch in 1998 and is currently associate professor of Operations Research at this department. His research interests include non-linear knapsack problems and the application of optimisation techniques in diverse elds such as agriculture, production, scheduling and voting theory.</p>

ABSTRACT

Optimal assignment and scheduling of workers and tasks on an assembly line

In this paper the assignment of cross-trained and temporary workers to tasks on an assembly line is investigated. Cross-trained workers are skilled to perform more than one task on the assembly line in the production process. Temporary workers are viewed as either trained or untrained and may be hired or laid off as required. The solution procedure may be divided into three parts. During the first part a model is formulated to determine an optimal assignment

of the workers to the production tasks. During the second part the model is extended to determine the effect of the assignment of both trained and untrained temporary workers to the tasks on the assembly line. During the final part of the model an optimal sequence of tasks in the assembly line is determined that minimises the resulting execution times of these tasks.

During the first part the objective is to maximise the total production utility. This is achieved by implementing a two-phase model. The first phase maximises the utility of production by minimising labour shortage in the assembly line. During the second phase the improvement of the workers' levels of skill is maximised while the effect of the learning and forgetting of skills is taken into consideration. A learn-forget-curve model (LFCM) is implemented to model the effect of this human characteristic on the master model. This approach ensures that the advantageous cross-trained nature of the workers is maintained and optimized, without a large deviation from the solution determined by the first phase.

The objective of the second part is to minimise the labour cost of production by determining the best type of workers for a certain task as well as the manner in which they should be hired or laid off. A worker is classified as either permanently or temporarily employed. Temporarily employed workers are further classified as either untrained or cross-trained workers. The assignment of workers to tasks on the assembly line is achieved by means of a Master Production Scheduling (MPS) model. The MPS has as its objective the minimisation of the total labour cost of performing all the tasks. The labour cost is defined as the sum of the temporary workers' daily wages, the overtime cost of permanent workers, the overtime cost of temporary workers and the cost of employing and laying off temporary workers.

Finally, during the third part an optimal sequence of tasks is determined in the production process in order to minimise the total production time. This is achieved by means of a two-phase dynamic assembly line balancing model, which is adjusted to incorporate the critical path method. During the first phase, an optimal task sequence is determined, while during the second phase, an optimal assignment of tasks to workstations and the timing thereof, is determined.

The practical applicability of the model is demonstrated by means of a real life case study. The production of various styles of shoes in a leatherworks factory is considered. The production of each style requires a different set of tasks and each task requires a different level of skill. The factory under consideration employs both cross-trained and temporary workers and data sets were obtained empirically by observation, interviews and questionnaires. Upon execution of the first phase of the assignment model, an optimal utility is found and the second phase is able to maximise the increase of the workers' skill level without deviation from this optimum. Upon execution of the employment model, it is found that labour costs are minimized by increasing the use of temporary workers and by assigning the maximum allowable number of overtime hours to them. Upon application of the scheduling model, an improved time is obtained compared to the standard execution time of each style. The results obtained from the case study indicate that the application of the model presented in this paper shows a substantial improvement in production, while reducing the cost of labour as well as improving the overall level of workers' skills. A multi-objective model is thus developed which successfully maximises production utility, maximises skill development of workers, minimises labour costs and the occurrence of idle workers as well as minimises total execution time.

KEYWORDS: Production scheduling, learning curves, multi-objective optimisation, signment, assembly line balancing.

TREFWOORDE: Produksie-skedulering, leerkrommes, meerdoelige optimering, toewysmonteerbaanbalansering.

OPSOMMING

Die optimale aanwending van kruisopgeleide werkslui in 'n produksielyn word ondersoek. Kruisopgeleide werkslui het die vermoë om haas enige taak in die produksieproses te verrig. 'n Wiskundige model om die optimale toewysing van werkers aan take te bepaal, word geformuleer. Die invloed van vaardige of onvaardige tydelike werkslui op die produksielyn word ook ondersoek. Die finale model neem verskeie doelwitte in ag. In die eerste fase word 'n nutsfunksie van produksie gemaksimeer terwyl werkers aan take toegewys word. Daarmee saam word die verbetering van die werkers se vaardigheidsvlakke gemaksimeer terwyl die effek van die leer en vergeet van vaardighede in ag geneem word. Die arbeidskoste van produksie word ook geminimeer terwyl die tipe werkers en die manier waarop hulle aangestel en afgelê moet word, bepaal word. Laastens word die totale produksietyd geminimeer terwyl die optimale volgorde van die take in die produksieproses bepaal word. Die praktiese bruikbaarheid van die model word ook met behulp van 'n gevallestudie gedemonstreer.

1 INLEIDING

Kompetisie noop besighede om werkers optimaal aan te wend. Indien kruisopgeleide werkers gebruik word, vermeerder die maniere hoe werkers aangewend kan word. Kruisopgeleide werkers kan aangewend word waar hulle die nodigste is omdat elkeen vaardig is in meer as een taak. Hierdie plooibaarheid van die werksmag laat die behoefte ontstaan om die werkers se aanwending wiskundig te optimeer. Kruisopgeleide werkers moet dus gekies en aan verskillende take toegeken word om die produksietempo te maksimeer.

Wanneer arbeid die primêre produksiehulpbron is, verskaf 'n kombinasie van tydelike en permanente werkers 'n effektiewe manier om wisselende aanvraag te bevredig terwyl arbeidskoste so laag moontlik gehou word. Gewoonlik is die koste verbonde aan die aanstel en aflê van tydelike werkers laag. 'n Verdere voordeel is dat tydelike werkers op baie kort kennisgewing, soos wat hulle benodig word, aangestel kan word, en daar is dus min motivering om 'n te groot poel permanente werkers te hê.

Die probleem wat dus ontstaan en hier bestudeer word, is om die optimale aanwending van kruisopgeleide, permanentaangestelde werkers te bepaal deur die aanstelling van beide opgeleide en moontlik onopgeleide tydelike werkers in ag te neem.

Hierdie probleem word gemodelleer deur nuwe modelle te skep en bestaande modelle aan te pas en saam te voeg. Die bestaande modelle wat aangepas en saamgevoeg word, asook ander gepubliseerde werk waarop hierdie studie berus, word kortliks in §2 bespreek. In §3 word 'n dubbelfase-optimeringsmodel ontwikkel. In hierdie model word daar eerstens 'n taakspesifieke nutsfunksie geoptimeer en tweedens word die vaardigheidsontwikkeling van werkers geoptimeer deur die effek van die leer en vergeet van vaardighede in ag te neem. Die model verskaf die optimale toewysing van werkers aan take. Die optimale aanwending van permanente, vaardige werkers tesame met die aanstelling van tydelike, moontlik onvaardige werkers word in §4 gemodelleer. Hierdie model minimeer die koste verbonde aan die

toewysing van die verskillende tipe werkers. Die model verskaf dus die optimale aantal en tipe werkers wat in diens geneem moet word. In §5 word dinamiese monterbaanbalansering gebruik om die optimale volgorde van die produksieprosesse te bepaal. Laastens, in §6, word die bogenoemde drie modelle op 'n gevallestudie toegepas. In die gevallestudie word die totale nut van vervaardiging gemaksimeer, terwyl die totale uitvoertyd en die totale arbeidskoste van vervaardiging geminimeer word.

2 LITERATUUR

In sy ondersoek van die optimale toewysing van werkers in 'n produksie-opset vind Campbell [5] dat kruisopleiding van werkers oor die algemeen voordelig is, veral wanneer daar 'n groot variasie in die vraag na die produkte is. Campbell en Diaby [6] verskaf ook 'n heuristiek wat die toewysingsprobleem effektief oplos.

'n Belangrike vraag, wanneer na die aanwending van kruisopgeleide werkers gekyk word, is hoe om die effek van die aanleer en vergeet van vaardighede in die besluitnemingsproses te inkorporeer. Nembhard [16] vind dat die moeilikheidsgraad van 'n taak en ondervinding die tempo waarteen werkers vergeet hoe om daardie taak te verrig, beduidend beïnvloed. Hy stel dus voor dat individuele leer- en vergeettempo's in ag geneem moet word wanneer werkers toegewys word. Shafer *et al.* [23] maak soortgelyke gevolgtrekkings nadat die effek van leer en vergeet op 'n monterbaan tydens 'n simulاسie waargeneem is.

Baily [1], Globerson *et al.* [8] en Schtub *et al.* [22] het ná simulاسie- en empiriese ondersoeke die volgende gevolgtrekkings oor die effek van die vergeet van aangeleerde vaardighede gemaak.

1. Die hoeveelheid ondervinding wat voor onderbreking per taak opgedoen word, beïnvloed die vergeettempo.
2. Die lengte van die onderbreking beïnvloed die vergeettempo.
3. Die heraanleertempo van 'n vergete taak is dieselfde as die oorspronklike aanleertempo.
4. Leer- en vergeettempo's is spieëlbeelde van mekaar, sodat 'n werker wat 'n taak vinnig aanleer daardie taak ook weer vinnig sal vergeet.

Die dubbelfase-optimeringsmodel wat in §3 gebruik word, gebruik Sayin en Karabati [21] se model as vertrekpunt. Hulle model los die toewysingsprobleem op terwyl dit die effek van leer en vergeet ook in ag neem. Hierdie model word uitgebrei om die LFCM (*Learn-Forget Curve Model*) van Jaber en Bonney [11], soos voorgestel deur Jaber *et al.* [12], te inkorporeer.

Techawiboonwong *et al.* [25] gebruik 'n meesterskeduleringsmodel (die sogenaamde MPS-T-Model) waarmee die aanstel van sowel vaardige as onvaardige tydelike werkers gemodelleer kan word. Hulle gevolgtrekking is dat die gebruik van tydelike werkers beduidende voordele en kostebesparings inhou. Hierdie model word aangepas sodat dit in §4 gebruik kan word. Die resultate van die MPS-T-model ondersteun die gevolgtrekking van Foote en Folta [7] dat tydelike werkers meestal suksesvol in vervaardiging gebruik kan word wanneer daar groot fluktuاسies in die vraag na die betrokke produk is. As verdere ondersteuning vir die gebruik van tydelike werkers bevind Jarmon *et al.* [13] in 'n ondersoek by 96 ondernemings dat tydelike werkers hulle wat die kwaliteit van werk aanbetref net so goed soos permanente werkers van hul taak gekwyd het.

'n Produksielyn kan effektief deur dinamiese monterbaanbalansering (Eng: *dynamic assembly-line balancing*) gemodelleer word. Gedurende monterbaanbalansering word die

verskillende take in 'n produksieproses toegewys aan 'n aantal werkstasies terwyl 'n sekere doel geoptimeer word. Hierdie toewysing bepaal die uitleg van die monteerbeaan in terme van totale aantal werkstasies, die vervaardiging se uitvoertyd sowel as die optimale volgorde van die take. Ghosh en Gagnon [9] beskryf die SALBP (*Simple Assembly-Line Balancing Problem*) waar die balanseringsprobleem opgelos word deur sekere vereenvoudigende aannames te maak. Spesiale gevalle wat uit die SALBP volg, word byvoorbeeld deur Bowman [3], Patterson en Albracht [17], en Thangavelu en Shetty [24] gemodelleer en opgelos.

3 DUBBELFASE-OPTIMERINGSMODEL

In die eerste fase van die model word 'n nutsfunksie van vervaardiging gemaksimeer, terwyl werkers aan take toegewys word. In die tweede fase word die verbetering van die werkers se vaardigheidsvlakke gemaksimeer terwyl die afwyking van die eerste fase se doelfunksiewaarde binne 'n gekose grens gehou word.

Die model word gebruik om werkers volgens hulle aanvanklike vaardigheidsvlakke aan take toe te ken. Elke werker se veranderende vaardigheidsvlakke word dan aangepas volgens individuele leerkurwes sodat nuwe besluite tydens die volgende toewysingsperiode geneem kan word.

Die twee essensiële beginwaardes vir hierdie model is die nutswaardes van die take en die werkers se aanvanklike vaardigheidsvlakke. Laat die arbeidstekort die verskil wees tussen die vaardigheidsvlakke van werkers wat aan 'n taak toegeken is en die arbeidsvlak wat daarvoor benodig word. Naas Campbell [5] se formulering van die nutsfunksie as 'n kwadratiese funksie van hierdie arbeidstekort per taak word Nembhard [16] se formulering van die vaardigheidsvlakke van elke werker per taak as 'n hiperboliese leerkurwe in die model gebruik.

Die model berus op die volgende twee aannames. Aanvaar dat wanneer 'n werker aan 'n taak toegewys word, die werker se vaardigheid van daardie taak sal verbeter volgens sy individuele leerkurwe en dat hierdie model slegs gebruik sal word om 'n enkelperiodetoewysingsprobleem op te los. Die afvoer van 'n periode kan dan gebruik word as invoer vir die daaropvolgende periode.

Laat $d = 1, \dots, D$ die indeks vir al die take wees, sodat D die totale aantal take is wat gedurende die produksieproses uitgevoer moet word, dan moet die volgende koëffisiënte vir die modelle in Fase I en Fase II bepaal word: die arbeidsvereiste R_d vir elke taak d ; 'n binêre koëffisiënt r_d , wat die waarde 1 het as opleiding/ondervinding vir taak d benodig word en die waarde 0 andersins; die maksimum aantal werkers m_d wat aan taak d toegeken kan word; 'n nutskoëffisiënt u_d vir taak d en 'n toelaatbare afwyking β van die Fase 1 optimale oplossing gedurende die oplossing van Fase II.

Gestel verder dat $w = 1, \dots, W$ die indeks oor al die permanente werkers is, met W die totale aantal permanent aangestelde werkers dan moet die volgende veranderlikes ook gedefinieer word om in die modelle van Fase I en/of Fase II te gebruik: die vaardigheidsvlak c_{wd} van werker w vir taak d ; die nuwe (verbeterde of verswakte) vaardigheidsvlak \hat{c}_{wd} van werker w in taak d as gevolg van leer en vergeet; 'n binêre veranderlike X_{wd} , wat die waarde 1 aanneem as werker w aan taak d toegewys is en met die waarde 0 andersins; die arbeidsvlak S_d van taak d nadat toewysings gemaak is; die totale nutsfunksiewaarde U van die produksie; en die nutsfunksie

$$U_d(S_d) \begin{cases} -u_d S_d^2 & \text{as } S_d < 0 \\ u_d S_d & \text{andersins} \end{cases}$$

vir elke taak d .

3.1 Fase I

In Fase I word die totale nutsfunksiewaarde van die vervaardiging gemaksimeer deur die arbeidstekort per taak te minimeer. Hierdie tekort word as 'n kwadratiese funksie gemodelleer. Fase I kan wiskundige gemodelleer word as

$$\text{maksimeer } U^* = \sum_{d=1}^D U_d(S_d) \quad (1)$$

onderhewig aan

$$r_d X_{wd} \leq c_{wd}, \quad w = 1, \dots, W, d = 1, \dots, D \quad (2)$$

$$\sum_{w=1}^W X_{wd} \geq 1, \quad d = 1, \dots, D \quad (3)$$

$$\sum_{d=1}^D X_{wd} \leq m_d, \quad w = 1, \dots, W \quad (4)$$

$$\sum_{w=1}^W c_{wd} X_{wd} - R_d = S_d, \quad d = 1, \dots, D \quad (5)$$

$$X_{wd} \in \{0, 1\}.$$

Beperking (2) verseker dat 'n taak wat vaardigheid vereis slegs deur 'n vaardige werker behartig sal word. Beperking (3) verseker dat elke werker aan 'n taak toegeken word. Beperking (4) verseker dat daar nie meer as die toelaatbare aantal werkers aan 'n taak toegeken word nie. Beperking (5) bereken die arbeidsvlak per taak as die som van die vaardigheidsvlakke van al die werkers wat aan 'n taak toegeken is minus die arbeidsvereiste van daardie taak. Hoe hoër die arbeidsvlak, hoe vinniger word 'n taak verrig. Optimering behels dus die minimering van die produksietyd deur middel van die maksimering van die arbeidsvlak.

3.2 Fase II

Die totale toename in die vaardigheidsvlakke per taak van elke werker word in die tweede fase gemaksimeer. Hierdie toename word as 'n hiperboliese leerkurwe in (6) gemodelleer. Die arbeidstekort per taak word weer eens bereken as die som van die vaardigheidsvlakke van al die werkers wat aan 'n taak toegeken is minus die arbeidsvereiste van daardie taak (10). Fase I se doelfunksie word as beperking (11) bygevoeg om saam met beperking (12) te verhoed dat daar nie verder as $(100 - \beta)\%$ van U^* afgewyk word nie. Fase II kan dan gemodelleer word as

$$\text{maksimeer } z^* = \sum_{d=1}^D \sum_{w=1}^W \frac{\hat{c}_{wd}}{c_{wd}} X_{wd} \quad (6)$$

onderhewig aan

$$r_d X_{wd} \leq c_{wd}, \quad w = 1, \dots, W, \quad d = 1, \dots, D, \quad (7)$$

$$\sum_{w=1}^W X_{wd} \geq 1, \quad d = 1, \dots, D, \quad (8)$$

$$\sum_{d=1}^D X_{wd} \leq m_d, \quad w = 1, \dots, W, \quad (9)$$

$$S_d = \sum_{w=1}^W c_{wd} X_{wd} - R_d, \quad d = 1, \dots, D, \quad (10)$$

$$U = \sum_{d=1}^D U_d S_d^2, \quad (11)$$

$$U \geq (1 - \beta)U^*, \quad (12)$$

$$X_{wd} \in \{0, 1\}. \quad (13)$$

Bepaling van aanvangsvaardigheidsvlakke

Die vaardigheid van 'n werker is 'n kombinasie van verskeie eienskappe wat strek van formele akademiese kennis wat bekom is tot algemene ondervinding wat in die bedryf aangeleer of opgedoen is. Sulke eienskappe is dikwels moeilik om te kwantifiseer, en daarom word Portela [19] se model vir hierdie doel gebruik.

Wanneer werkers die bedryf betree, word daar aangeneem dat hulle 'n sekere mate van onderrig het wat hulle individuele leertempo beïnvloed. Gestel die werker w se aanvangsvaardigheidsvlak vir taak d word gegee deur $c_{wd} = \mu_s \alpha$ waar μ_s die bevolking se gemiddelde aantal skooljare voltooi, en α die verbeteringsfaktor is wat die werklike aantal skooljare wat die werker voltooi het, in ag neem.

'n Kumulatiewe logistieke verdeling word gebruik om die verbeteringsfaktor α te bereken. Die verdeling word sò gekies dat dit die gewenste marginale invloed op waardes wat ver van die gemiddeld verwyderd is, kan hê. Let op dat die verbetering benaderd lineêr is vir waardes wat naby aan die gemiddeld lê.

Die verbeterde aanvangsvaardigheidsvlak vir werker w word dus gegee deur

$$c_{wd} = \mu_s \times \left(0.5 + \frac{e^{\frac{s_{w0} - \mu_s}{\sigma_s}}}{1 + e^{\frac{s_{w0} - \mu_s}{\sigma_s}}} \right) \quad (14)$$

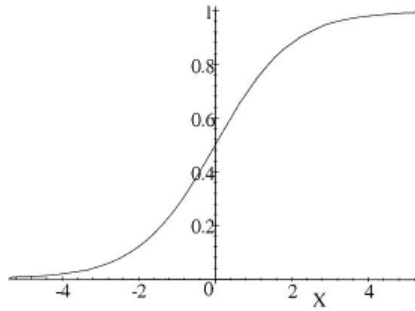
waar s_w die aantal skooljare wat werker w voltooi het, en σ_s die standaardafwyking van die gemiddelde aantal skooljare μ_s is.

Die kumulatiewe logistiese verdeling waar

$$X = \frac{e^{\frac{s_{w0} - \mu_s}{\sigma_s}}}{1 + e^{\frac{s_{w0} - \mu_s}{\sigma_s}}}$$

die vlak van skoolonderrig voorstel, word in Figuur 3.1 getoon. Dit illustreer die idee dat 'n werker wat min skooljare voltooi het, toenemende voordeel uit verdere onderrig sal ge-

niet. Ná 'n tydperk van onderrig sal so 'n werker steeds voordeel daaruit trek, maar met verminderende waarde.



Figuur 3.1: Logistiese kumulatiewe verdelingsfunksie.

Die effek wat verdere ondervinding op 'n werker se aanvangsvaardigheid het, kan soortgelyk gekwantifiseer word, sodat

$$c_{wd} = \mu_s \left(0.5 + \frac{e^{\frac{s_{ws} - \mu_s}{\sigma_s}}}{1 + e^{\frac{s_{ws} - \mu_s}{\sigma_s}}} \right) \left(0.5 + \frac{e^{\frac{o_{ws} - \mu_o}{\sigma_o}}}{1 + e^{\frac{o_{ws} - \mu_o}{\sigma_o}}} \right) \quad (15)$$

waar o_w die aantal jare is waarin werker w ondervinding opgedoen het, en σ_o die standaardafwyking is van die gemiddelde aantal jare ondervinding μ_o .

Bepaling van aangepaste vaardigheidsvlakke

Indien slegs die effek van aanleer van vaardighede in ag geneem word, word die tyd wat dit 'n werker neem om 'n taak te verrig, gegee deur

$$T_{nwd} = \begin{cases} T_{1wd} n^{-b_w} & \text{as } n \geq n_{sd}, \\ T_{sd} & \text{andersins.} \end{cases}$$

In hierdie formulering is T_{1wd} die tyd wat dit werker w neem om taak d vir die eerste keer te verrig, vir $w = 1, \dots, W$ en $d = 1, \dots, D$; b_w die leerhelling ($0 < b < 1$) van werker w , vir $w = 1, \dots, W$; n_{sd} die aantal keer wat taak d uitgevoer moet word voordat die standaarduitvoertyd bereik word, vir $d = 1, \dots, D$; en T_{sd} die standaarduitvoertyd van taak d , vir $d = 1, \dots, D$.

Die LFCM [12] neem die effek van vergeet ook in ag en word gegee deur

$$\hat{T}_{xwd} = \begin{cases} \hat{T}_{1wd} x_d^{f_{wd}} & \text{as } y_{wd} \leq Y_d, \\ T_{1wd} & \text{andersins,} \end{cases} \quad (16)$$

waar \hat{T}_{xwd} die tyd is wat dit werker w neem om taak d vir die x -de keer te verrig met inagnam van die effek van vergeet, vir $w = 1, \dots, W$ en $d = 1, \dots, D$; x_d die potensiële aantal opeenvolgende kere is wat 'n werker taak d sou verrig as hy/sy nie onderbreek was nie, vir $d = 1, \dots, D$; \hat{T}_{1wd} die aanvangstyd is wat dit werker w neem om taak d te verrig voordat die effek van vergeet 'n rol speel, $w = 1, \dots, W$ en $d = 1, \dots, D$; f_{wd} die helling

van die vergeetkurwe is, met ander woorde die vergeettempo van werker w per taak d , vir $w = 1, \dots, W$ en $d = 1, \dots, D$; y_{wd} die aantal kere per toewysing is wat werker w nie aan taak d toegeken word nie en dus nie taak d verrig nie, vir $w = 1, \dots, W$ en $d = 1, \dots, D$; en Y_d die maksimum aantal kere is wat taak d nie verrig word nie voordat 'n werker minimaal vaardig in daardie taak word, vir $d = 1, \dots, D$.

Die vergeettempo f_{wd} in (16) word bepaal deur

$$f_{wd} = \frac{b_w(1 - b_w) \log(v_d)}{\log\left(1 + \frac{D}{(T_{sd})}\right)},$$

waar v_d die aantal kere per toewysingsperiode is wat taak d verrig moet word. Die vergeetkurwe se afsnit word bepaal deur

$$\hat{T}_{1wd} = T_{1wd} v_d^{-(b_w + f_{wd})}.$$

Die berekende \hat{T}_{xwd} word gebruik om \hat{c}_{wd} te bepaal. Die persentasie verbetering of verswakking in die uitvoertyd is direk eweredig aan 'n persentasie verbetering of verswakking in die vaardigheidsvlak van 'n werker waar die bogrens vir die vaardigheidsvlak gelyk aan 10 is en die ondergrens gelyk aan 1. Ons aanvaar dus dat 'n werker nie totaal onvaardig in 'n taak sal word as gevolg van vergeet nie.

Redelinghuis *et al.* [20] stel voor dat die leerhelling, b_w , bereken word as die kwosient van die logaritmiëse individuele leertempo, l , en die logaritmiëse vermeerdering van uitset, sodat

$$b_w = \frac{\log l}{\log 2} \quad (17)$$

waar $0.5 < l \leq 1$.

4 INVLOED VAN TYDELIKE WERKERS

Die dubbelfase-model soos in §3 beskryf, moet verder uitgebrei word om tydelike werkers in ag te neem. Dit word met behulp van die MPS-T-model gedoen. Laat $i \in \{1, 2, 3\}$, waar $i = 1$ opgeleide tydelike werkers, $i = 2$ onopgeleide tydelike werkers en $i = 3$ permanente werkers voorstel. Die volgende koëffisiënte moet vooraf bepaal word om in die model te gebruik: α_i is die gemiddelde lone per tipe i werker per toewysingsperiode wees, β_i die aanstelkoste van 'n tipe i werker, θ_i die aflêkoste van 'n tipe i werker, π_i die oortydskoste vir tipe i werker per uur, h die maksimum aantal normale kantoorure beskikbaar per werker per periode, en γ is die maksimum toelaatbare aantal oortydure per werker.

Die volgende veranderlikes moet gedefinieer word om in die wiskundige model te gebruik. Laat R_i en F_i die aantal tipe i werkers wees wat aan die begin van die periode onderskeidelik aangestel en afgelê word. Definieer verder die totale aantal toegewysde normale kantoorure en oortydure van tipe i werkers as H_i en O_i onderskeidelik. Gestel laastens dat S_i en S_i^* totale aantal tipe i werkers wat onderskeidelik tydens die huidige vervaardigingsperiode en vorige vervaardigingsperiode aangestel word.

Die invloed van tydelike werkers kan nou wiskundig geformuleer word as

$$\text{minimeer } Z = \sum_{i=1}^2 (\alpha_i S_i + \beta_i R_i + \theta_i F_i) + \sum_{i=1}^3 \pi_i O_i \quad (18)$$

onderhewig aan

$$S_i - S_i^* - R_i + F_i = 0, \quad \text{vir } i = 1, 2 \quad (19)$$

$$\frac{1}{h} H_i \leq S_i, \quad \text{vir } i = 1, 2, 3 \quad (20)$$

$$O_i \leq \gamma S_i, \quad \text{vir } i = 1, 2, 3. \quad (21)$$

Die MPS-T-model se doelfunksie (18) minimeer die som van die tydelike werkers se daaglikse lone, die oortydskoste van permanente werkers, die oortydskoste van tydelike werkers, die aanstelkoste van tydelike werkers en die aflêkoste van tydelike werkers, om sodoende die totale arbeidskoste te minimeer. Beperkings (19) hou tred met hoeveel opgeleide en onopgeleide tydelike werkers per periode aangestel is. Beperkings (20) verseker dat die aantal werkers wat toegewys word nie die aantal werkers wat werklik aangestel is, oorskry nie, terwyl beperkings (21) die oortyd beperk tot die toelaatbare hoeveelhede.

5 DINAMIESE MONTEERBAANBALANSERING

Monteerbane vorm die komponente van baie produksiesisteme. Die ontwerp en balansering van monteerbane is kompleks en is as *NP*-moeilik bewys deur Wee en Magazine [26]. Die balanseringsproses behels die toewysing van take aan werkers op so 'n manier dat 'n doelfunksie (byvoorbeeld die aantal werkstasies of die totale produksietyd) geoptimeer sal word.

Die voorgangerverhoudings tussen take kan voorgestel word deur 'n voorgangergrafiek. Gestel die voorgangergrafiek G word gegee deur $G = (V, E)$ waar elke nodus in die versameling $V = \{1, \dots, D\}$ 'n taak voorstel. Die nodusse word geweeg deur die standaarduitvoertyd t_p van taak p , met $p = 1, \dots, D$. Die versameling E is die versameling van noduspare sodat boog (p, q) , met $p, q \in V$, beteken dat taak p 'n direkte voorganger van taak q is.

Boysen en Fliedner [4] stel voor dat monteerbaanbalansering in twee stappe opgelos word. In die eerste stap word die voorgangergrafiek gereduseer tot 'n reeks van take (ϕ sodat $\phi_p \in V(p-1, \dots, D)$) wat 'n reguit lyn vorm. Elke element r van ϕ is gelyk aan die indeksnommer van die taak wat aan posisie r van die monteerbaan toegewys gaan word. Tydens die tweede stap word die gesorteerde reeks take dan aan werkstasies toegewys. Klein [14] het bewys dat vir enige reeks en totale uitvoertyd hierdie toewysingsprobleem as 'n kortste-roeteprobleem opgelos kan word.

5.1 Reeksbepaling

Wanneer die volgorde van die take bepaal word, is dit belangrik dat alle voorgangerverhoudings in ag geneem word om ontoelaatbare toewysings aan werkstasies te verhoed. Orderingsreëls moet ontwikkel word wat sal bepaal of 'n sekere taak in 'n sekere posisie op die monteerbaan geplaas mag word.

Monteerbane word gewoonlik op 'n linêre wyse as 'n reguit lyn gemodelleer. Gestel \mathcal{O} is die versameling take wat nog nie in 'n posisie op die monteerbaan geplaas is nie. Gestel \mathcal{I} is die versameling take wat reeds in 'n posisie op die monteerbaan geplaas is. Die versameling \mathcal{P}_ℓ bevat al die take wat in posisie ℓ geplaas mag word, sodat

$$\mathcal{P}_\ell = \{\ell \mid \ell \in \mathcal{O}, k \in \mathcal{I} \text{ vir alle } (k, \ell) \in E\}.$$

Met ander woorde, 'n taak ℓ kan net in 'n posisie geplaas word as al sy voorgangers reeds in posisies geplaas is.

5.2 Toewysing aan werkstasies

Wanneer 'n toelaatbare reeks bepaal is, kan die take aan werkstasies toegeken word. Die probleem kan as 'n SALBP gemodelleer word sodat die doel is om die totale produksietyd c te minimeer wanneer die aantal werkstasies m vasgestel is. Die kritiekepadmetode (CPM) word geïnkorporeer om die optimale duur van die vervaardiging te bepaal.

Laat x_d die tydstop wees waarop taak d aan sy werkstasie toegeken word, vir $d = 1, 2, \dots, D$; \mathcal{W}_d die subversameling van die werkers wees wat aan taak d toegewys is, met $d = 1, 2, \dots, D$; c_{wd} die aanvangsvaardigheid wees van werker w wat aan taak d toegeken is (soos bepaal in § 3); \tilde{c}_d die moeilikheidsgraad van taak d wees, $d = 1, \dots, D$; t_d die tydsduur van taak d ; en t_{ds} die standaarduitvoertyd van taak d wees.

Die probleem kan wiskundig geformuleer word as

$$\text{minimeer } z = x_D - x_1 \quad (22)$$

onderhewig aan

$$x_\ell \geq x_k + t_k, \quad \text{vir alle } \mathcal{P}_\ell, \quad (23)$$

$$t_d = t_{ds} + \frac{\tilde{c}_d - \frac{1}{|\mathcal{W}_d|} \sum_{w \in \mathcal{W}_d} c_{wd}}{\frac{1}{|\mathcal{W}_d|} \sum_{w \in \mathcal{W}_d} c_{wd}} t_{ds}, \quad d = 1, \dots, D. \quad (24)$$

Beperking (23) verseker dat 'n taak net aan 'n werkstasie toegeken word nadat al sy voorgangers toegeken is. Beperking (24) bepaal die uitvoertyd van taak i met behulp van die vaardigheidsvlakke van die werkers wat aan daardie taak toegeken is. Die persentasie waarmee die kumulatiewe vaardighede meer of minder as die moeilikheidsgraad van die taak is, bepaal met hoeveel die uitvoertyd vinniger of stadiger as die standaarduitvoertyd is.

6 GEVALLESTUDIE

'n Onderneming wat leerskoene vervaardig word in die gevallestudie gebruik. Die eienaar besit sowel die fabriek waarin die skoene ontwerp en vervaardig word as drie fabriekswinkels waaruit die skoene verkoop word. Daarby voorsien die onderneming ook skoene aan ketting-winkels en boetieks en het die onderneming weekliks 'n stalletjie op die plaaslike vlooiemark. In die gevallestudie word die optimale aanwending van die werkslui in die fabriek bepaal. Die onderneming het tans 10 permanent aangestelde werkers. Hierdie werkers is kruisopgelei. Die produksieproses bestaan uit 'n aantal take, maar nie elke styl skoene wat vervaardig word, vereis al hierdie take nie. Tydens die besigste produksietydperke word tydelike werknemers aangestel.

6.1 Data

Om die werking van die model aan die hand van 'n gevallestudie te illustreer, word die vervaardiging van Styl 1 gemodelleer. Die fabriek vervaardig egter in een seisoen meer as vyftig style. Hier volg 'n beskrywing van die take in die produksieproses van al die style wat vervaardig word:

- Klik:* Die sny van vorms uit rou leer. Hierdie vorms is óf die bokante van die skoene óf hulle vorm die binnesole. Voerings vir skoene word ook met behulp van klikking uitgesny.
- Skif:* Die uitdun van die leer op spesifieke areas sodat die leer maklik daar kan vou.
- Vou:* Die vou van die leer op die uitgedunde areas om byvoorbeeld some te skep.
- Detail:* Detail soos juwele, gespes, gaatjies en ander stylspesifieke toevoegings word tydens hierdie proses op die bokante van die skoene aangebring.
- Kleur:* Die kleur van sekere style se binnesole.
- Sny:* Die invoeging van gleuwe waardeur riempies kan pas vir sekere style se bokante.
- Voering:* Die afsny van oortollige voering aan die bokante.
- Afwerk:* Die omsoming van blootgestelde ru-sye van die bokante.
- Stiksel:* Die stik van die bokante en binnesole met behulp van naaimasjiene.
- Handstiksel:* Die stik van moeilike of gedetailleerde werk wat slegs met die hand gedoen kan word.
- Vlegwerk:* Die vleg van die leer van sekere style se bokante.
- Stempel:* Die aanbring van die maatskappy se logo op die binnesole.
- Gom:* Die aanwending van gom aan sowel die bokante as die binnesole om die skoene te lym.
- Slyp:* Die slyp van die agterkante van die binnesole ter voorbereiding vir die las aan die sole.
- Merk:* Die strekking van die leer oor houtvorms om byvoorbeeld voerpunte of hakke te skep.
- Lees:* Die vorming van die rou leer oor 'n skoenelees om 'n spesifieke styl te kry.
- Smeer:* Die behandeling van die binnesole om dit vir hegting aan die sole voor te berei.
- Verhit:* Die aktivering van die aangewende gom deur verhitting.
- Druk:* Die las van al die dele van die skoene onder hoë druk sodat al die gegomde dele stewig plak.

Ons verwys na hierdie take volgens hul taaknommers. In Tabel 6.1 word die taaknommers en die aantal permanent aangestelde werkers wat elk van hierdie take kan verrig, verskaf.

Die moeilikheidsgraad per taak word met behulp van ondervraging van die werkers as 'n waarde op 'n skaal tussen 1 en 10 beskryf waar 'n waarde van 1 beteken dat 'n taak uiters maklik aangeleer en uitgevoer kan word, terwyl 'n waarde van 10 beteken dat die taak uiters moeilik aangeleer en uitgevoer word. In Tabel 6.1 word die moeilikheidsgraad per taak gelys, en dit verskaf 'n aanduiding van of vaardigheid in 'n taak van 'n werker wat daaraan toegewys word, vereis word. 'n Waarde van 0 beteken dat 'n onopgeleide werker steeds die taak suksesvol sal kan verrig, terwyl 'n waarde van 1 beteken dat 'n taak vorige opleiding en/of ondervinding vereis.

Die werkers se vaardigheidsvlakke per taak word op 'n tienpuntskaal beskryf waar 'n waarde van 1 beteken dat die werker uiters onvaardig is, terwyl 'n waarde van 10 beteken dat die werker uiters vaardig is. 'n Waarde van 5 beteken dat die werker die taak gemiddeld kan behartig, 'n waarde van 3 dui op ondergemiddelde vaardigheid, 'n waarde van 8 dui op bogemiddelde vaardigheid, ensovoorts. Die vaardigheidsvlakke per taak per werker is met behulp van ondervraging van die werkers bepaal en word in Tabel 6.2 vervat. 'n Strepie dui aan dat die werker glad nie die betrokke taak kan verrig nie. Daar is genoeg masjiene en fasiliteite in die fabriek om die aanstel van addisionele, tydelike werkers moontlik te maak. Daar is egter 'n beperking op die beskikbaarheid van ruimte in die fasiliteit wat 'n

TABEL 6.1: Die take, hul taaknommers met die aantal werkers wat dit kan verrig, sowel as die moeilikheidsgraad per taak en of vaardigheid vir 'n taak vereis word.

Taak-nommer	Taak	Aantal Werkers	Maksimum toedeling	Moeilikheds- graad	Vaardigheid vereis
1	Klik	1	4	8	1
2	Skif	2	1	5	1
3	Vou	3	2	5	0
4	Detail	8	4	7	0
5	Kleur	4	1	4	0
6	Sny	2	1	8	1
7	Voering	5	2	6	1
8	Afwerk	5	1	5	0
9	Stiksel	5	5	10	1
10	Handstiksel	8	3	10	1
11	Vlegwerk	6	1	7	1
12	Stempel	6	1	2	0
13	Gom	6	2	4	0
14	Slyp	4	1	6	1
15	Merk	7	2	6	1
16	Lees	3	3	9	1
17	Smeer	5	1	5	0
18	Verhit	3	1	1	0
19	Druk	4	1	5	0

TABEL 6.2: Vaardigheidsvlakke per werker.

Taaknr.	Taak	Werker									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Klik	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	Skif	8	-	-	-	-	-	-	10	-	-
3	Vou	8	10	8	-	-	-	9	-	-	-
4	Detail	8	8	10	8	10	7	-	6	-	-
5	Kleur	8	7	-	10	-	7	-	-	-	7
6	Sny	8	8	-	-	-	10	-	-	-	-
7	Voering	3	10	8	8	7	-	-	-	-	-
8	Afwerk	5	10	8	8	7	-	-	-	-	-
9	Stiksel	-	8	-	-	10	-	10	10	-	-
10	Handstiksel	-	8	8	10	5	8	5	5	-	-
11	Vlegwerk	-	8	-	10	5	10	-	5	-	-
12	Stempel	8	10	10	10	3	-	-	3	-	5
13	Gom	5	8	-	10	-	10	7	-	10	10
14	Slyp	5	1	-	-	-	-	-	-	10	5
15	Merk	8	4	5	10	8	-	-	-	5	10
16	Lees	5	-	-	-	-	-	-	-	5	10
17	Smeer	5	-	5	-	-	-	5	-	-	10
18	Verhit	5	-	-	-	-	-	-	-	10	5
19	Druk	8	1	-	-	-	-	-	-	10	10

maksimum toedeling van werkers aan daardie taak veroorsaak. Hierdie aantal werkers word ook in Tabel 6.1 verskaf.

Die volgorde van die take wat in die vervaardiging van Styl 1 uitgevoer moet word, word in Tabel 6.3 vervat. Dit bevat ook die standaarduitvoertyd van elke taak vir hierdie styl.

TABEL 6.3: Die take wat in die vervaardiging van Styl 1 uitgevoer moet word saam met hul standaarduitvoertye (SUT) in minute en hul voorgangers.

Proses	Taak	Taaknr.	SUT	Voorgangers
Bokante	Klik	1	60	-
	Skif	2	10	1
	Vou	3	84	2
	Detail	4	15	3,7
Binnesole	Klik	1	20	-
	Kleur	5	5	5
	Sny	6	20	6
	Gom	13	10	4
	Slyp	14	5	8
	Gom	13	5	9
	Verhit	18	1	10
	Druk	19	2	11

6.2 Numeriese resultate

Fase I

Daar is in totaal tien permanente werkers in diens van die onderneming, sodat $W = 10$. Styl 1 het in totaal 12 take wat uitgevoer moet word, sodat $D = 12$. Al die take is ewe belangrik en daarom is nutskoëffisiënte met dieselfde bogrens (van 10 eenhede) aan al die take toegeken wat sy volle arbeidsvereiste (of meer) in die betrokke toedeling kry. Indien 'n taak nie sy volle arbeidsvereiste ontvang nie, word die nutskoëffisiënte u_d vir daardie take bereken as die breuk van die 10 eenhede wat gelyk is aan die breuk van die arbeidsvereiste wat aan daardie taak toegeken is (dit wil sê die totale arbeidsvereiste minus die persentasie arbeidstekort gedeel deur die totale arbeidsvereiste). Die moeilikheidsgraad van elke taak word in Tabel 6.1 verskaf, en die arbeidsvereiste per taak, R_d , is gelyk aan hierdie moeilikheidsgraad gestel. Die maksimum aantal werkers wat per taak toegeken kan word, word ook in Tabel 6.1 gegee. Die aanvangsvaardighede, c_{wd} , wat in Tabel 6.2 gegee word, is gebruik in die oplossing van die model.

Hierdie model is geprogrammeer en met behulp van Lingo [15] opgelos. Die oplossing ná Fase I word in Tabel 6.4 opgesom. Die doelfunksiewaarde ná Fase I vir Styl 1 het dus 'n totale nutswaarde van $U^* = 92$ eenhede.

Vaardigheidsvlakke

Die veranderde vaardigheidsvlakke, \hat{c}_{wd} , met $d = 1, \dots, 19$ en $w = 1, \dots, 10$, word vervolgens bereken. Bepaal \hat{T}_{xwd} soos in vergelyking (16) beskryf: Die waarde van b_w word bepaal soos beskryf in (17) terwyl T_{1wd} geneem kan word as 4 keer die standaarduitvoertyd T_{sd} , soos deur Jaber et al. [12] voorgestel. Daar word ook aangeneem [12] dat 'n werker gewoonlik die standaarduitvoertyd van 'n taak bereik nadat die taak slegs een keer (met ander woorde na voltooiing van 12 pare skoene) verrig is. Gevolglik kan $n_{sd} = 12$ met $d = 1, \dots, D$

TABEL 6.4: 'n Optimale toewysing vir werkers aan take vir Styl 1 nadat Fase I opgelos is.

Nr	Taak	Werker									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Klik	X									
2	Skif								X		
3	Vou		X					X			
4	Detail	X		X	X	X					
5	Kleur				X						
6	Sny						X				
13	Gom									X	X
14	Slyp									X	
18	Verhit									X	
19	Druk									X	
Totale nutswaarde = 92 eenhede											

gebruik word. Verder is deur Jaber *et al.* [12] waargeneem dat werkers vaardigheid in 'n taak verloor as hulle dit vir 10 of meer opeenvolgende toewysings nie verrig nie. Gevolglik word $Y_d = 10, d = 1, \dots, D$ gebruik in die oplossing van hierdie gevallestudie.

Fase II

Die waarde van β word op 0.01 gestel omdat Sayin en Karabati [21] aangetoon het dat dit 'n realistiese waarde is. Presies dieselfde waardes as vir Fase I geld verder. Nadat Fase I se doelfunksiewaarde in ag geneem is, is 'n optimale toewysing van werkers aan take vir Styl 1 vir die model in Fase II bereken. Hierdie oplossing word in Tabel 6.5 opgesom. Let op dat hierdie oplossing se totale nutswaarde is net so goed is as die totale nutswaarde in Fase I.

TABEL 6.5: 'n Optimale toewysing vir werkers aan take vir Styl 1 nadat Fase II opgelos is.

Nr	Taak	Werker									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Klik	X									
2	Skif								X		
3	Vou							X			
4	Detail			X		X					
5	Kleur				X						
6	Sny		X								
13	Gom						X				
14	Slyp									X	
18	Verhit									X	
19	Druk										X
Totale nutswaarde = 92 eenhede											

MPS-T-model

Die totale nut van die vervaardiging kan verhoog word deur genoeg werkers aan te stel sodat al die moontlike posisies gevul word. Daar is in totaal 23 posisies wat slegs deur vaardige werkers en 14 posisies wat ook deur onvaardige werkers gevul kan word.

Die fabriek se totale uitset kan ook verhoog word deur oortydwerksure aan al die tipes werkers toe te ken. Die beperking $\gamma \leq 10$ veroorsaak dat die toekenning van die maksimum aantal oortydure aan 'n werker gelykstaande is aan 'n kwart van die nut wat verkry sou word as 'n tydelike werker eerder aangestel sou word. Die beperkings

$$S_1 + 0.25O_1 + 0.25O_3 + 10 = 23, \quad (25)$$

en

$$S_2 + 0.25O_2 = 14. \quad (26)$$

word dus bygevoeg en verseker onderskeidelik dat die aantal werkers wat aangestel word en die kombinasie van hulle met die oortyduur-ekwivalente al die moontlike posisies vul.

Die onderneming se arbeidsbeleid word gemodelleer deur sowel wetgewing as die onderneming se bestuursbesluite in ag te neem. Tydelike werkers word op 'n weeklikse basis aangestel of afgelê. Permanente en tydelike werkers werk 40 normale kantoorure per week, sodat $h = 40$. Opgeleide tydelike werkers word R20 per uur (kantoorure) betaal, sodat $\alpha_1 = 800$. Hierteenoor word onopgeleide tydelike werkers R15 per uur (kantoorure) betaal, sodat $\alpha_2 = 600$. Daar is geen koste verbonde aan die aanstel van nuwe werkers nie, wat beteken dat $\beta_1 = \beta_2 = 0$, maar die aflêkoste is gelyk aan een week se vergoeding, sodat $\theta_1 = 800$ en $\theta_2 = 600$. Opgeleide tydelike en permanente werkers word R22 per uur (oortyd) betaal, dit wil sê $\pi_1 = \pi_3 = 22$, en onopgeleide tydelike werkers word R17 per uur (oortyd) betaal, sodat $\pi_2 = 17$. Volgens wetgewing mag geen werker meer as 10 uur per week oortyd werk nie, sodat $A = 10$. Aan die begin van die periode wat ondersoek word, het die betrokke onderneming geen tydelike werkers in diens nie sodat $S_1^* = S_2^* = 0$.

Op grond van hierdie data lewer die MPS-T-model 'n oplossing met 'n minimum koste van R4244 per week. Hierdie doelfunksiewaarde stem ooreen met die volgende oplossing:

$$O_1 = 0, O_2 = 40, O_3 = 52, R_1 = 0, R_2 = 4, F_1 = 0, F_2 = 0.$$

Hierdie resultaat bepaal dus dat 4 onopgeleide tydelike werkers aangestel moet word, terwyl 40 uur (oortyd) in totaal aan hierdie tydelike werkers toegeken word en 53 uur (oortyd) in totaal aan die permanente werkers toegeken word.

Indien die modelle in Fase I en Fase II opgelos word met die inagneming van hierdie nuutaangestelde tydelike werkers word 'n toewysing soos in Tabel 6.6 as 'n optimale oplossing verkry.

Die totale nut van hierdie toewysing is nie 'n verbetering op die totale nut van die toewysing sonder tydelike werkers nie, aangesien die tydelike werkers onvaardig is en dus nie die nut (wat 'n mate van vaardigheid is) beïnvloed nie. As dieselfde tydelike werkers tydens die volgende siklus van vervaardiging behou word, sal die effek van die aangeleerde vaardighede die nut verhoog. Die voordeel van die tydelike werkers lê egter in die verbetering van totale produksietyd.

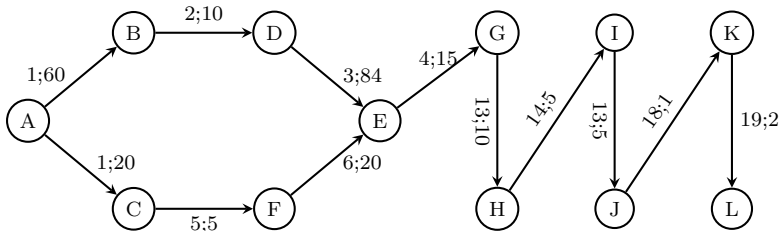
Monteerbaanbalansering

Die voorgangergrafiek vir al die take wat tydens die vervaardiging van Styl 1 benodig word, word in Figuur 6.2 verskaf. Die byskrifte by die boë is die taaknommer gevolg deur 'n dubbelpunt en die standaarduitvoertyd van daardie taak.

Die moeilikheidsgraad, \tilde{c} , vir elke taak word in Tabel 6.1 gegee.

TABEL 6.6: 'n Optimale toewysing van take aan werkers vir Styl 1 met tydelike werkers in ag geneem.

Nr	Taak	Permanente Werkers										Tydelike Werkers			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	Klik	X													
2	Skif								X						
3	Vou		X									X			
4	Detail			X		X							X		X
5	Kleur				X										
6	Sny						X								
13	Gom							X						X	
14	Slyp									X					
18	Verhit									X					
19	Druk										X				
Totale nutswaarde = 92 eenhede															



Figuur 6.2: Voorgangergrafiek vir die take van Styl 1.

Monteerbaanbalansering lewer die optimale tydstop waarop elke taak aan sy werkstasie toegeken kan word. Tabel 6.7 lewer die totale uitvoertyd van die vervaardiging van Styl 1, eerstens wanneer die prosesse teen die standaarduitvoertye uitgevoer word en tweedens wanneer die prosesse teen die verbeterde tye as gevolg van optimale toewysing van werkers soos bo beskryf, uitgevoer word.

'n Verbetering van 12 minute teenoor die standaarduitvoertyd word dus getoon. Die totale uitset verhoog nie net omdat die style in 'n korter tydperk vervaardig word nie, maar ook omdat daar teen die berekende minimale koste steeds nog van die oortydure gebruik gemaak kan word.

7 SAMEVATTING

'n Optimeringsmodel is ontwikkel wat verskeie uitkomstebereik. Die hoofdoelwit van die model is bereik deurdat die totale nut van die produksieproses gemaksimeer en die vaardigheidskort per taak geminimeer word, terwyl die behoud en ontwikkeling van werkers se vaardighede optimaal verbeter word, sodat hulle voordelige kruisopgeleide aard behoue bly. Verder word die totale arbeidskoste van beide permanente en tydelike werkers geminimeer en die situasie in die praktyk dat daar werkers is waaraan geen take toegewys is nie, word geëlimineer. Laastens word die totale uitvoertyd per styl geminimeer wat in wese dieselfde is as om die totale uitset van die fabriek te maksimeer.

TABEL 6.7: Totale uitvoertye saam met die standaard- en aangepaste uitvoertye sowel as die onderskeidelike aanvangstye van elke taak. Alle tye word in minute gegee.

Nr	Taak	Standaard tydsduur	Aanvangs- tye	Aangepaste tydsduur	Aanvangs- tye
1	Klik	60	0	48	0
2	Skif	10	60	5	48
3	Vou	84	70	93	53
4	Detail	15	154	21	146
1	Klik	20	0	16	0
5	Kleur	5	20	2	16
6	Sny	20	25	20	18
13	Gom	10	169	4	167
14	Slyp	5	179	3	171
13	Gom	5	184	2	174
18	Verhit	1	189	1	176
19	Druk	2	190	1	179
Minimum totale uitvoertyd			192		180

Die model is aan die onderneming voorgelê en die positiewe terugvoer van die eienaar (en bestuurder) is dat die resultate toepasbaar in die besigheid sal wees. Die bestuurder stem ook saam dat die teoretiese resultate realistiese verbeterings toon teenoor die huidige praktyk. Nieteenstaande die positiewe terugvoer voel die bestuurder dat hy nie die model in sy onderneming wil toepas nie. Sy hoofrede hiervoor is dat hy nie vertroue in wiskundige modelle in die algemeen het nie.

VERWYSINGS

- [1] Bailey, C.D. (1989). Forgetting and the learning curve: A laboratory study, *Management Science*, 35(3):346–352.
- [2] Becker, C. & Scholl, A. (2006). A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing, *European Journal of Operational Research*, 168(3):694–715.
- [3] Bowman, E.H. (1960). Assembly-line balancing by linear programming, *Operations Research*, 8:385–389.
- [4] Boysen, N. & Fliedner, M. (2006). A versatile algorithm for assembly line balancing, *European Journal of Operational Research*, 184(1):39–56.
- [5] Campbell, G.M. (1999). Cross-utilization of workers whose capabilities differ, *Management Science*, 45(5):722–732.
- [6] Campbell, G.M. & Diaby, M. (2002). Development and evaluation of an assignment heuristic for allocating cross-trained workers, *European Journal of Operational Research*, 138(1):9–20.
- [7] Foote, D.A. & Folta, T.B. (2002). Temporary workers as real options, *Human Resource Management Review*, 12:579–597.

- [8] Globerson, S., Levin, N. & Shtub, A. (1989). The impact of breaks on forgetting when performing a repetitive task, *IIE Transactions*, 21:376–381.
- [9] Ghosh, S. & Gagnon, R.J. (1989). A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems, *International Journal of Production Research*, 27:637–670.
- [10] Hopp, W.J., Tekin, E. & Van Oyen M.P., (2004). Benefits of skill chaining in serial production lines with cross-trained workers, *Management Science*, 50(1):83–98.
- [11] Jaber, M.Y. & Bonney, M.C. (1997). A comparative study of learning curves with forgetting, *Applied Mathematical Modelling*, 21:523–531.
- [12] Jaber, M.Y., Kher, H.V. & Davis, D.J. (1997). Countering forgetting through training and deployment, *International Journal of Production Economics*, 85:33–46.
- [13] Jarmon, R., Paulson, A. & Rebne, D. (1998). Contractor performance: How good are contingent workers at the professional level?, *IEEE Transactions on Engineering Management*, 45(1):11–19.
- [14] Klein, M. (1963). On assembly line balancing, *Operations Research*, 11:274–281.
- [15] LINGO. (2007). *Lindo systems' index page*, <http://www.lindo.com/>, [4 Augustus 2007].
- [16] Nemhard, D.A. (2000). The effects of task complexity and experience on learning and forgetting: A field study, *Human Factors*, 42(2):272–286.
- [17] Patterson, J.H. & Albracht, J.J. (1975). Assembly-line balancing: Zero-one programming with Fibonacci search, *Operations Research*, 23:166–172.
- [18] Pinker, E.J. & Shumsky, R.A. (2000). *The efficiency-quality tradeoff of cross-trained workers*, *Manufacturing and Service Operations Management*, 2(1):32–48.
- [19] Portela, M. (2001). Measuring skill: a multi-dimensional index, *Economics Letters*, 72:27–32.
- [20] Redelinghuis, A., Julyan, F.W., Steyn, B.L. & Benade, F.J.C. (1989). *Kwantitatiewe metodes vir besluitneming*, Tweede uitgawe, Pretoria:Butterworths.
- [21] Sayin, S. & Karabati, S. (2005). Assigning cross-trained workers to departments: A two-stage optimization model to maximize utility and skill improvement, *European Journal of Operational Research*, 176(3):1643–1658.
- [22] Shtub, A., Levin, N. & Globerson, S. (1993). Learning and forgetting industrial skills: Experimental model, *International Journal of Human Factors in Manufacturing*, 3:293–305.
- [23] Shafer, A.M., Nemhard, D.A. & Uzumeri, M.V. (2001). The effects of worker learning, forgetting, and heterogeneity on assembly line productivity, *Management Science*, 47(12):1639–1653.

- [24] Thangavelu, S.R. & Shetty, C.M. (1971). Assembly line balancing by zero-one integer programming, *IIE Transactions*, 3:61–68.
- [25] Techawiboonwong, A., Yenradee, P. & Das, S.K. (2005). A master scheduling model with skilled and unskilled temporary workers, *International Journal of Production Economics*, 103:798–809.
- [26] Wee, T.S. & Magazine, M.J. (1982). Assembly line balancing as generalized bin packing, *Operations Research Letters*, 1:56–58.
- [27] Wright, T. (1936). Factors effecting the cost of airplanes, *Journal of Aeronautical Sciences*, 3:122–128.

